

Для повышения эффективности работы слоевых печей кипящего слоя целесообразно использование утилизаторов теплоты в виде секционных каскадных теплообменников, обеспечивающих подогрев готового продукта.

Проведены исследования влияния количества секций на эффективность работы такого утилизатора при рабочей температуре основного технологического процесса 2700 °С. Согласно полученным результатам оптимальным можно считать утилизаторы с компоновкой секций по схеме 2:2, 3:3, 4:4.

#### Список использованных источников

1. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1981. 296 с., ил.
2. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. Минск: Наука и техника, 1973. 176 с.
3. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. Киев: Выпашк., 1988. 328 с.

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ ОКИСЛЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК ПРИ НАГРЕВЕ ПОД ЗАКАЛКУ

Дружинин Г.М., Самойлович Ю.А., Попов Е.В.

*ОАО «Научно–исследовательский институт металлургической теплотехники»,  
г. Екатеринбург, Россия*

На Нижнесалдинском металлургическом заводе (НСМЗ) запущено производство рельсовых накладок, являющихся одним из основных элементов верхнего строения железнодорожного пути.

Нагрев рельсовых накладок перед закалкой осуществляется в толкательной печи проходного типа – двухручьевого с верхним и нижним нагревом металла. Рельсовые накладки длиной от 500 до 1000 мм перемещаются по направляющим из жаропрочной стали, установленным на поперечных перегородках из шамотного кирпича. Печь отапливается природным газом с использованием скоростных рекуперативных горелок типа REKUMAT M300 и REKUMAT M250 производства фирмы WS (Германия). Установленная тепловая мощность печи – 1500 кВт, полная производительность печи – до 5 тонн в час.

После ввода нагревательной печи в эксплуатацию выявлена нежелательная тенденция к избыточному прогреву рельсовых накладок, который сопровождается усиленным окалинообразованием. В результате на выходе из нагревательной печи наблюдается слипание между собой соседних накладок, что приводит к частичной отбраковке продукции и нарушению ритмичной работы технологического комплекса.

В связи с этим возникла необходимость определения рациональных режимов работы нагревательной печи с пониженным окалинообразованием. Решение этой задачи расчетным путем нуждается в наличии адекватной математической модели процесса нагрева в печи рельсовых накладок.

Определение поля температур в нагреваемой накладке основано на численном решении уравнения нестационарной теплопроводности

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

при задании начального условия

$$T(t_0) = T_0 \quad (2)$$

Граничные условия на поверхности заготовки учитывают совместный теплообмен излучением и конвекцией [1].

На рис. 1 приведена конфигурация рельсовой накладке типа Р65, и указаны основные размерные показатели поперечного сечения: высота – 130 мм, ширина – 45,6 мм, толщина тонкой стенки накладки – 21 мм. Там же указаны четыре наиболее характерные точки поперечного сечения накладки, расположенные на верхней (1) и нижней (2) кромках, а также в центре массивной части верха и низа накладки.

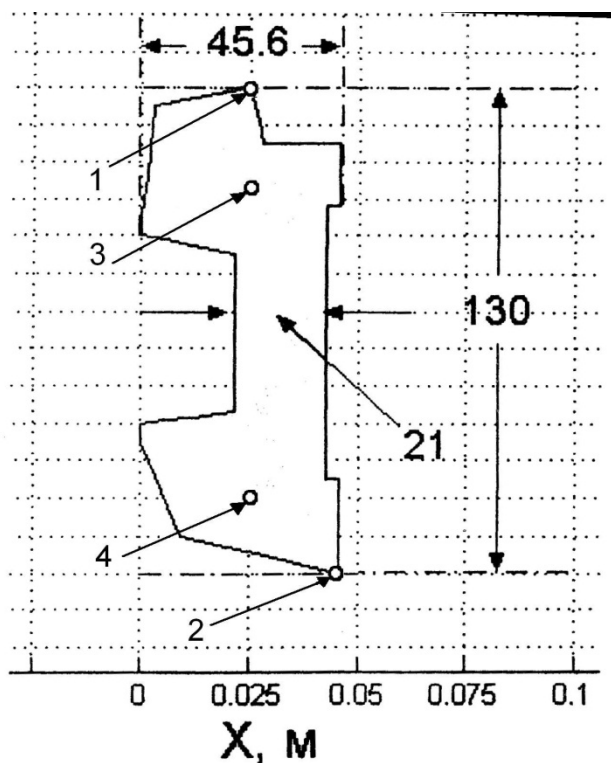


Рис. 1. Конфигурация рельсовой накладки формата Р65 и расположение контрольных точек в поперечном сечении

При настройке теплового режима печи через ее рабочее пространство пропускали опытную заготовку, оснащенную хромель-алюмелевыми термопарами; горячие спаи термопар измеряли температуру в двух контрольных точках поперечного сечения, указанных номерами 3 и 4 на рис 1.

На рис. 2 кружками указанные в опытах показатели температуры металла в центре массивной части верха рельсовой накладки (точка 3 на схеме рис. 1).

Приведенные расчетные исследования показали, что вполне удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений температур в контрольной точке №3 сечения заготовки получается при изменении температуры греющих газов в первой зоне к торцу посада (вытяжному зонду) с 900 до 300 °С (рис. 3), что соответствует практическим значениям на уровне металла.

Исследованию кинетики окисления стали при повышенных температурах посвящено большое число работ. Считается доказанным, что зависимость скорости окисления от температуры подчиняется закону Аррениуса [2–4].

В конкретных расчетах скорости окисления стали формула Аррениуса преобразуется к виду дифференциального уравнения

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K_0}{2h} \exp\left[-\frac{B}{T(t)}\right] \quad (3)$$

при соблюдении начального условия

$$h|_{t=t_0} = h_0 \quad (4)$$

где  $K_0$  – константа, мм<sup>2</sup>/ч;

$\Delta C$  – разность концентраций диффундирующего реагента на границах окисла;

$D$  – коэффициент диффузии;  
 $n$  – коэффициент пропорциональности.  
 $B$  – константа, К;  
 $h$  – толщина слоя окалины, м.

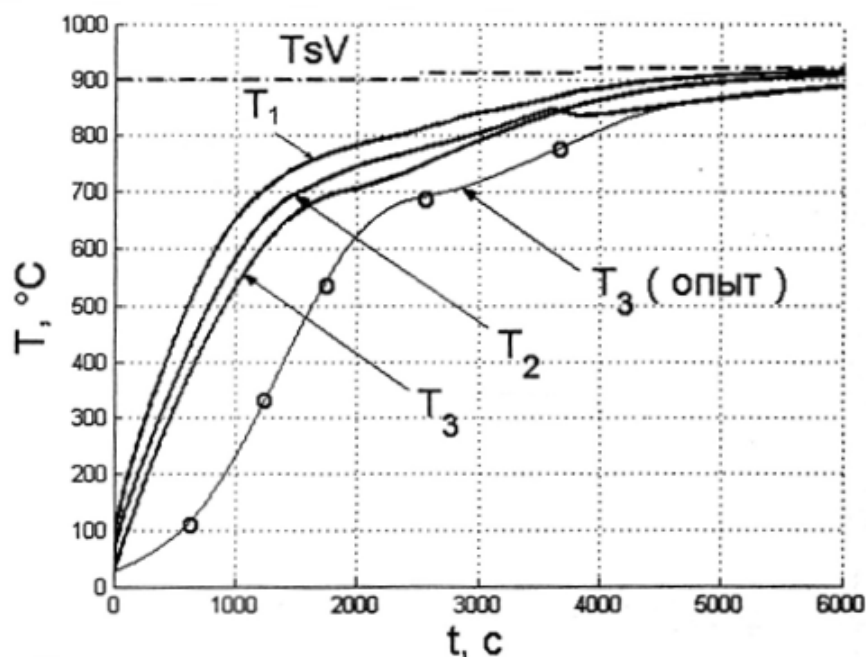


Рис. 2. Изменение во времени температур на вершинах накладке (точки 1, 2 рис. 1) и в центре массивного участка верха накладки (точка 3 рис. 1) для режима № 1; кружки – результаты измерения температуры в массивной части верха накладки

Введем в рассмотрение параметр

$$W = \frac{dh^2}{dt} = K_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (5)$$

где  $W$  – количество окалины, пропорциональное количеству продиффундировавшего кислорода, г/м<sup>2</sup>,

и приведем интеграл дифференциального уравнения к виду

$$h_k^2 = K_0 \int_{t_0}^{t_k} \left\{ \exp\left[-\frac{B}{T_{i\dot{a}}(t)}\right] \right\} dt \quad (6)$$

Осуществляя интегрирование в решении (6) при заданном графике изменения во времени температуры поверхности заготовки и извлекая квадратный корень из полученного значения  $h_k^2$ , получим значение толщины слоя окалины к моменту завершения процесса нагрева металла в печи ( $h_k$ ). При вычислениях необходимо использовать значения эмпирических показателей скорости окисления  $K_0$  и  $B$  для исследуемой марки стали.

Опыт показывает, что для большинства промышленных марок стали скорость окисления при низких температурах пренебрежимо мала и становится ощутимой лишь при температуре, превышающей 700–800 °С. На основании этих данных прирост толщины слоя окалины на поверхности нагреваемых заготовок учитывался лишь в том интервале времени нагрева, где температура поверхности превышает пороговое значение температуры  $T_{кр} = 750$  °С.

В качестве первого варианта определим толщину слоя окалины для условий нагрева рельсовой накладки при существующем режиме нагрева с заданной зависимостью изменения температуры во времени в точке 1 поперечного сечения накладки, представленной графиком на рис. 3. Используя понятие пороговой температуры  $T_{кр} = 750$  °С, рассчитывалась толщина слоя окалины для интервала времени  $t_R = 3700$  с, начало которого совпадает с моментом достижения данной температуры.

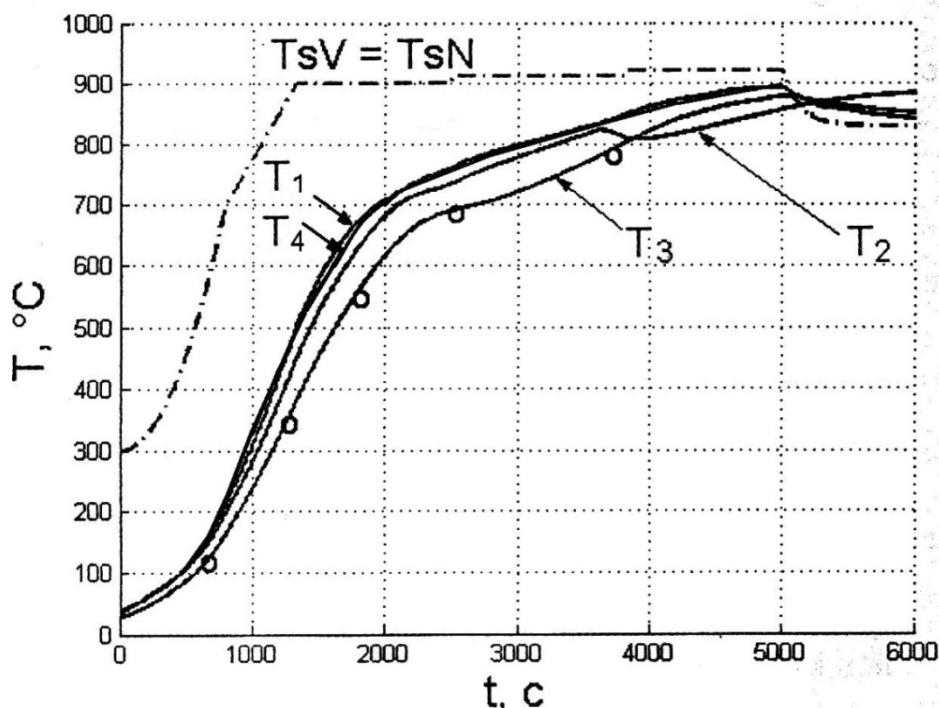


Рис. 3. Изменение во времени температур на вершинах накладки (точки 1, 2 рис. 1) и поверхности верхнего рельсового накладки (4) для режима № 1; кружки – результаты измерения температуры в массивной части верхнего накладки

При вычислениях используем значения показателей скорости окисления углеродистой стали  $K_0=2 \times 10^4$  мм/с и  $B = 18000$  К по данным Н.П. Кузнецовой [2; 3].

Выполнение расчета с использованием MATLAB-программы приводит к значению толщины слоя окалины в точке 1 верха накладки, равному  $h_{max}=2,72$  мм.

В качестве второго варианта определялась толщина слоя окалины в той же точке верха накладки при режиме нагрева, позволяющем сократить длительность пребывания металла при температурах превышающих пороговое значение  $750$  °C. Один из возможных вариантов скорректированного режима отопления нагревательной печи состоит в соблюдении следующих условий:

- для первой зоны печи – отключение верхней и нижней горелок;
- для второй и третьей зон печи следующее изменение уставок температуры  $T_s$  для сводовых термпар: для верхних участков зон – снижение до уровня  $860$  °C, для нижних участков – повышение до уровня  $950$  °C.

В этом случае длительность пребывания металла при температурах, превышающих пороговое значение  $750$  °C, составляет  $t_R = 1850$  с.

Повторяя вычисления с использованием MATLAB-программы, получаем значение максимальной толщины слоя окалины, равное  $1,17$  мм.

Таким образом, при скорректированном режиме отопления нагревательной печи представляется возможным более чем в два раза сократить толщину слоя окалины на верхней поверхности рельсового накладки.

Полученные расчетные результаты представляют интерес, но их достаточно трудно проверить экспериментальным путём.

В производственных условиях наблюдается осыпание окалины, нарастающей на окисляемой поверхности заготовок, что не позволяет определять реальную толщину окисленного металла в процессе нагрева. Структура нарастающей окалины существенно зависит от химического состава стали; в ряде случаев возникает рыхлая, пористая окалина. Оценка степени угара металла по толщине слоя рыхлой, пористой окалины является недостаточно надежной и может использоваться в основном для сравнительной оценки.

Более надежным и пригодным для практического применения является, на наш взгляд, способ оценки угара металла, примененный Темлянцевым М.В. [5]. Степень угара металла при нагреве определяется из решения дифференциального уравнения

$$\frac{dM}{dt} = K_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (7)$$

где  $M$  – удельная степень угара ( $\text{гр}/\text{см}^2$ ),  $T$  – абсолютная температура (К),  $K_0$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в статье [5]:

$K_0 = 16,5$  ( $\text{гр}^2/\text{см}^4\text{мин}$ ) и  $B = 14085$  К для стали М54, содержащей 0,45–0,62 % С; 0,50–0,85 % Мn; 0,15–0,35 % Si.

Значения удельной массы угара  $M$  ( $\text{гр}/\text{см}^2$ ) определяются в результате интегрирования дифференциального уравнения (7) при задании начального условия

$$M = 0 \text{ при } t = t_0 \quad (8)$$

где  $t_0$  – момент времени, при котором температура на окисляемой поверхности превышает критическое значение, соответствующее началу интенсивного окисления металла.

В ходе интегрирования учитывается изменение во времени температуры на окисляющейся поверхности нагреваемой заготовки; при этом зависимость  $T = T_{\text{нов}}(t)$  определяется на основании решения соответствующей задачи теплопроводности (1).

В расчетах исследована степень окисления поверхности рельсовой накладки так же для двух вышеописанных режимов нагрева.

При этом длительность интенсивного окисления составляет  $t_R \cong 60$  минут для режима №1 и  $t_R \cong 40$  минут для режима № 2.

Определение удельной массы угара осуществляется с использованием двух MATLAB-программ путем численного определения значений интеграла

$$M^2 = K_0 \int_{t_0}^{t_k} \left\{ \exp\left[-\frac{B}{T_{\text{и\acute{a}}}(t)}\right] \right\} dt \quad (9)$$

Результаты интегрирования с последующим извлечением квадратного корня из величины  $M^2$  привели к следующим значениям удельной массы угара стали марки М54:

– для режима нагрева № 1:

$$M = 0,0576 \text{ гр}/\text{см}^2;$$

– для режима нагрева № 2:

$$M = 0,0402 \text{ гр}/\text{см}^2.$$

Таким образом переход от существующего режима № 1 к более экономичному режиму № 2 сопровождается снижением угара металла на 31–32 % для изученной марки стали.

### Список использованных источников

1. Дружинин Г.М., Попов Е.В. Математическая модель нагрева металла в методической печи толкательного типа // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 5.
2. Кузнецова Н.П., Колченко Г.И. Влияние окалинообразования на интенсивность теплообмена в методических печах // Известия вузов. Черная металлургия. 1988. № 7. С. 123–126.
3. Шишкин В.А., Кузнецова Н.П. Исследование теплового состояния и потерь металла с угаром при горячем посаде непрерывнолитых слябов в нагревательные печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 55–58.
4. Темлянцев М.В., Михайличенко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. М.: Теплотехник, 2006. 200 с.
5. Темлянцев М.В., Стариков В.С. Темлянцев Н.В. Исследование окисления и обезуглероживания сталей для рельсов и рельсовых накладок при нагреве под прокатку // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. № 8. С. 36–38.